



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VÝROBA POKROČILÝCH ODLITKŮ ZE SLITIN
MĚDI A JEJICH VLASTNOSTI**

PRODUCTION AND PROPERTIES OF ADVANCED CU-BASED ALLOYS CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Kryštůfek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Tomáš Kryštůfek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba pokročilých odlitků ze slitin mědi a jejich vlastnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Odlitky ze slitin mědi měly a stále mají velké uplatnění v dnešním světě, ať už v průmyslu nebo v umění. V elektrotechnickém průmyslu jsou používány odlitky z téměř čisté elektrovedné mědi, které mají vynikající elektrickou a tepelnou vodivost, a využívají se k výrobě součástí do počítačů, kotlů a integrovaných obvodů. V praxi se dále využívají různé typy bronzů, např. Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-Al a další. Výroba takových odlitků zahrnuje velké množství technologií a výrobních procesů a mnoho z nich prošlo za posledních 20 let modernizací.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je přehledně zpracovat metody a postupy výroby pokročilých odlitků ze slitin mědi a jejich použití v průmyslu.

Seznam doporučené literatury:

MICHNA, Š., L. MICHNOVÁ. Neželezné kovy. Ústí nad Labem: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014, 245 s. ISBN 978-80-260-7132-7.

ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.

BRUNHUBER, E. Guss aus Kupferleierungen = (Casting copper-base alloys). Berlin: Schiele & Schön, 1986, 368 s. ISBN 3-7949-0444-3.

NABOKA, M., J. GIORDANO. Copper alloys: Preparation, properties and applications. Nova Science Publishers, 2011. ISBN 9-7816-1209-504-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 25. 10. 2018

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KRYŠTŮFEK Tomáš: Výroba pokročilých odlitků ze slitin mědi a jejich vlastnosti.

Tato bakalářská práce je zaměřena na přehledné zpracování problematiky výroby odlitků ze slitin mědi. Po stručném historickém uvedení je nejprve popsán postup výroby surové mědi. Pozornost je věnována zdrojům mědi v přírodě a následnému vytavení mědi žárovým způsobem, v nístějové peci a v konvertoru. Dále je popsána technologie tavení slitin mědi, tedy tavicích zařízení, plynů vznikajících při tavení, vedení tavby a dezoxidace. Elektrovodnou měď, tj. měď o velmi vysoké čistotě, je možné vyrábět rafinačním čištěním surové mědi v elektrolytu nebo elektrostruskovým přetavováním a taví dle tří technologických postupů. Nakonec jsou detailně zpracovány postupy tavení, vlastnosti a využití bronzů a mosazí – slévárenských slitin mědi.

Klíčová slova: měď, slitiny mědi, tavení slitin mědi, slévárenské slitiny mědi

ABSTRACT

KRYŠTŮFEK Tomáš: Production and properties of advanced Cu-based alloys castings

This bachelor thesis is focused on well-arranged processing of production copper alloy castings. Following a brief historical introduction, a process of producing crude copper is first developed. Attention is paid to the sources of copper in nature and the subsequent melting of copper in furnace and converter. Furthermore, the technology of melting copper alloys is elaborated meaning melting devices, melting gases, melting directions and deoxidation. Very high purity copper can be produced by refining the crude copper in an electrolyte or by electroslag remelting and melted according to three technological processes. There are finally elaborated the processes of melting, properties and use of bronze and brass in detail - foundry copper alloys.

Keywords: copper, copper alloys, melting of copper alloys, foundry copper alloys

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRYŠTŮFEK, Tomáš. *Výroba pokročilých odlitků ze slitin mědi a jejich vlastnosti* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117053>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí bakalářské práce Václav Kaňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 15. 5. 2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky a vedení při vypracovávání této závěrečné práce. Veliké díky také náleží mé rodině a přítelkyni za hmotnou i duševní podporu v celém průběhu studia.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD	9
1 METALURGIE MĚDI	10
1.1 TAVBA MĚDI ŽÁROVÝM ZPŮSOBEM.....	10
1.2 TAVBA MĚDI V PLAMENNÉ PECI.....	11
1.3 TAVBA MĚDI V KONVERTORU	12
2 TECHNOLOGIE TAVENÍ SLITIN NA BÁZI MĚDI	13
2.1 VSÁZKOVÉ SUROVINY A PLYNY VZNIKLÉ PŘI TAVENÍ	14
2.2 OXIDAČNÍ VEDENÍ TAVBY	15
2.3 REDUKČNÍ VEDENÍ TAVBY	16
2.4 DEZOXIDACE	17
3 VÝROBA SLITIN MĚDI S VYSOKOU EL. VODIVOSTÍ.....	19
3.1 RAFINAČNÍ ELEKTROLÝZA	19
3.2 ELEKTROSTRUSKOVÉ PŘETAVOVÁNÍ.....	20
4 TAVENÍ ČISTÉ MĚDI PRO ELEKTROTECHNICKÉ ÚČELY	23
4.1 KLASICKÝ POSTUP	23
4.2 STUPŇOVITÁ DEZOXIDACE	23
4.3 VÁZÁNÍ ZBYTKOVÉHO DEZOXIDOVADLA	23
5 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY MĚDI	25
5.1 BRONZY	25
5.1.1 Cínové bronzy	25
5.1.2 Tavení cínových bronzů	26
5.1.3 Hliníkové bronzy	26
5.1.4 Tavení hliníkových bronzů	27
5.1.5 Chromové bronzy	27
5.2 MOSAZI	28
5.2.1 Vliv legujících prvků na vlastnosti mosazí.....	28
5.2.2 Tavení mosazí.....	29
ZÁVĚRY	30
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	

ÚVOD

Těžba mědi spolu s jejím tavením a odléváním započala již kolem roku 4 500 př.n.l. Hned po zlatu je měď druhým nejstarším známým kovem. Na ostrově Kypr měli staří Féniciáné měděné doly, pro které užívali Římané název *aes cyprium*, z kteréhož se časem vytvořilo označení *Cuprum*, česky měď (zn. *Cu*). Nejstarší dochované odlitky byly nalezeny na území dnešního Turecka, Iránu a Kavkazu. Byť byl vývoj lidstva neodmyslitelně spjat s železem, počátky výroby odlitků, a tedy slévárenství jako takového, jsou spojeny s mědí a jejími slitinami s cínem a dalšími neželeznými kovy.^[1]

Měď lze charakterizovat jako měkký, tažný, houževnatý kov s dobrou svařitelností, odolností proti korozi a zejména pak vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí. Z jiných zajímavých vlastností mědi stojí za zmínku například její antibakteriální účinky. Lze říci, že všechny příměsi v mědi snižují její fyzikální vlastnosti – elektrickou a tepelnou vodivost. Prvky jako je hliník, železo, nikl, zinek, zlato nebo stříbro při vyšších koncentracích zvyšují mechanické vlastnosti mědi, naproti tomu prvky s malou rozpustností v mědi jako je bismut, olovo, antimon nebo síra výrazně mechanické vlastnosti zhoršují.^{[1], [2]}

Slitiny mědi se odlévají stejnými technologiemi jako jiné kovy, nejčastěji gravitačním litím do pískových nebo kovových forem, litím do keramických skořepin pomocí metody vytavitelného modelu a v neposlední řadě metodou odstředivého lití. Z tohoto důvodu je tato práce zaměřena především na metody tavení a metalurgické zpracování elektrovodné mědi a slitin mědi. Tyto procesy jsou klíčové při výrobě nejnáročnějších odlitků a nejvíce rozhodují o jejich kvalitě, proto jsou jejich znalost a pochopení tak důležité.

Slitiny mědi a odlitky z nich vyrobené jsou atraktivní zejména pro svoji vysokou elektrickou i tepelnou vodivost, jednoduchost výroby a vynikající korozivzdornost za specifických podmínek. Bronzy a mosazi mají v praxi širokou škálu využití, ať už jako plechy pro výrobu žesťových hudebních nástrojů, armatury, součástky v elektrotechnice, kotle pro výrobu destilátů v potravinářském průmyslu nebo odlitky ve slévárenství (obr. 1).



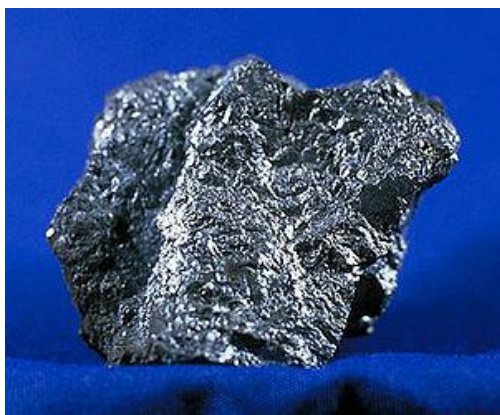
Obr. 1 Příklady výrobků ze slitin mědi^{[3], [4], [5]}

1 METALURGIE MĚDI

Už na konci doby kamenné věděl tamní člověk, jak účelně zpracovávat měď. Právě toto období od 6 000 do 3 000 let př.n.l. se nazývá doba měděná. Lidé tehdy tepali a kovali měď za studena, přičemž touto cestou docházelo k vytvrzení struktury dané součásti (pracovní nástroj, lovecká zbraň apod.). Tímto způsobem došlo k zefektivnění lovu i obhospodářování půdy, neboť opracování těchto nástrojů bylo vůči opracování kamene výrazně snazší a rychlejší. ^{[1], [2]}

Přelomové zpracovávání měděných rud nastalo, když lidé zjistili, že ještě lépe než kováním za studena lze měděnou rudu zpracovat tepelnou redukcí a následným vytavováním mědi. Tento jedinečný objev znamenal vznik nového technického oboru – metalurgie. Od této chvíle jsou veškeré pracovní nástroje, lovecké zbraně, ale i ozdobné předměty vyráběny odléváním. Rozmanitost těchto měděných předmětů je patrná z archeologických nálezů. Tehdejší domácnost byla prakticky celá z mědi, stejně tak potrubí a součásti spojené s přenosem a uskladňováním vody. ^{[1], [2]}

V přírodě se měď vyskytuje téměř výhradně ve sloučeninách. V zemské kůře se vyskytuje vzácně, v mořích a oceánech se její obsah pohybuje kolem 0,003 mg na litr vody. Pro průmysl se 85 % mědi získává ze sulfidických rud, nejvíce pak z chalkosinu Cu_2S (obr. 2), chalkopyritu CuFeS_2 (obr. 3) a kupritu Cu_2O . Mezi minerály s obsahem mědi patří např. malachit nebo azurit. ^[1]



Obr. 2 Chalkosin ^[6]



Obr. 3 Chalkopyrit ^[7]

Sulfidické rudy, z nichž se měď získává, obsahují daleko více železa než mědi (pouze kolem 1 % Cu). Vytěžená ruda se v prvním kroku musí nadrtit, poté jemně pomlít a upravit částečným oddělením hlušiny na rudný koncentrát. Ten obsahuje hodně síry, proto se na vzduchu praží, část síry tak vyhoří a dojde ke spečení koncentráту. Tímto způsobem se obsah mědi v koncentráту, který je dopravován do hutě a připraven k tavně žárovým způsobem, zvýší na 10 až 30 % Cu. V koncentráту jsou zastoupeny také jiné doprovodné prvky, jejichž získáním je výroba mědi hospodárnější. ^[1]

1.1 Tavnba mědi žárovým způsobem

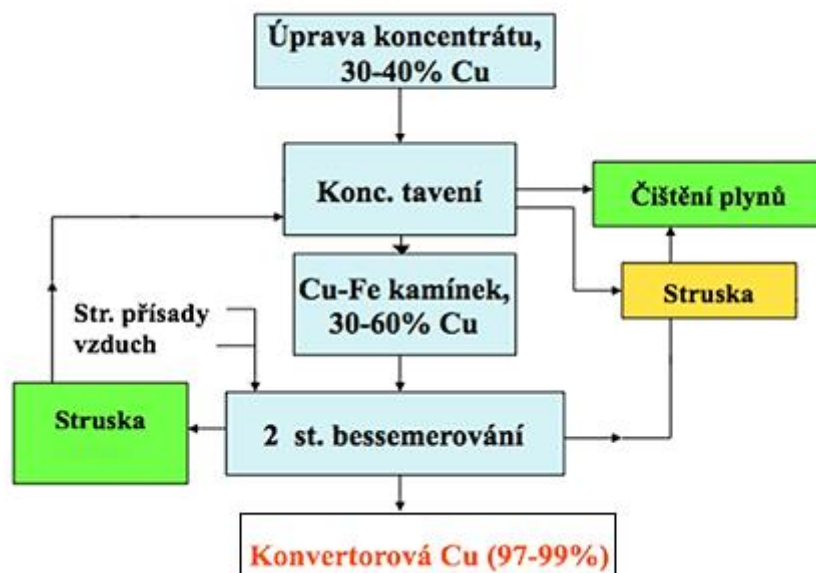
Suroviny pro výrobu mědi – rudy a koncentráty – se upravují pražením nebo aglomerací, jejichž hlavním cílem je odstranit síru z disulfidu železnatého (FeS_2), resp. obecně jakékoliv rudy obsahující měď a chemickými reakcemi převést sulfidy na oxidy. Následně vzniká praženec, který se dále taví. Hlavními produkty tavení jsou struska (jalovina) a tzv. kamínek. Ty jsou vzájemně nerozpustné a díky rozdílným hustotám vzájemně oddělitelné. Hustota kamínku je asi 5 g.cm^{-3} , hustota strusky 3,2 až 4 g.cm^{-3} . ^{[1], [8]}

Důležitý je v tomto případě kamínek, protože v něm se koncentruje měď. Kvalitní kamínek po tavení vznikne tehdy, pokud je při pražení vhodně upraven poměr mezi mědí a sírou. Výsledný poměr mezi nimi se vytváří díky oxidaci sulfidů v koncentráту. Při pražení za nižších

teplot se zejména uvolňuje síra, která shoří na oxid siřičitý (SO_2), ze kterého se následně vyrábí kyselina sírová (H_2SO_4) a také oxidují sulfidy železa. Ve výkonných etážových pecích je při pražení odsířeno 100 až 170 kg síry na 1 m^2 za 24 hodin. Definuje se tzv. stupeň odsíření, což je poměr mezi množstvím odstraněné síry a původním množstvím. ^{[1], [8]}

V kamínku jsou rozpuštěny sulfidy mědi a železa (asi 90 %), zbylé jsou sulfidy olova, niklu a zinku. Obsah mědi v kamínku bývá 25 až 45 %, obsah síry pak 23 až 26 %, ale čísla se v praxi mohou lišit, vše záleží na postupu výroby. S rostoucím obsahem mědi roste samozřejmě hustota kamínku. Teplota tavení kamínku se odvíjí od poměru Cu_2S ku FeS a většinou se pohybuje v rozmezí od 900 do 1050 °C. Strusky mají teplotu tavení o něco málo vyšší, zhruba 1050 až 1150 °C. Asi 85 % hmotnosti vzniklé strusky při tavení na kamínek tvoří oxidy, zejména oxid křemičitý, vápenatý a železnatý. Podstatná část mědi je soustředěná do kamínku, což má vliv na jakost vzniklé strusky. ^{[1], [8]}

Surová měď, tj. měď o čistotě 97 až 99 %, z kamínku vznikne tzv. bessemerováním. V případě potřeby je elektrolýzou možné vyrobit téměř dokonale čistou katodovou měď. Výstižné schéma žárové výroby mědi je vyobrazeno na obr. 4. ^{[1], [8]}



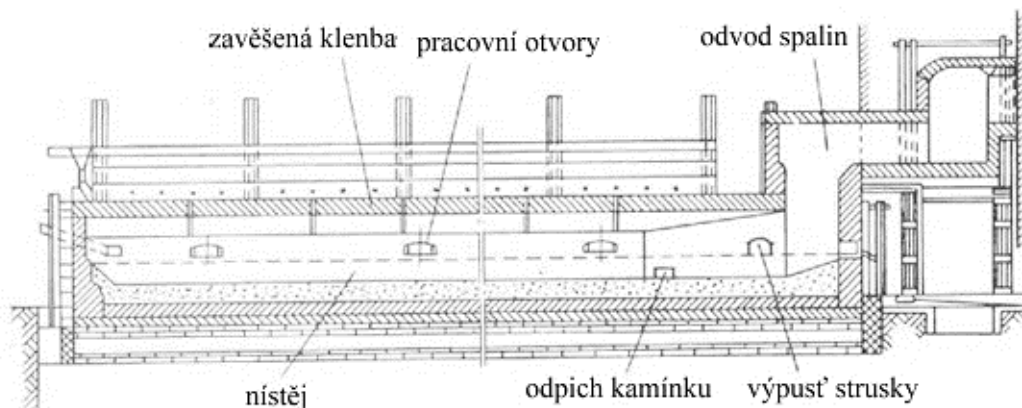
Obr. 4 Žárová výroba mědi ^[9]

1.2 Tavba mědi v plamenné peci

V práci o neželezných kovech uvádí její autor Michna, že zhruba 75 % celkové světové produkce mědi se vyrábí tavením v plamenných (nístějových) pecích. Ty jsou vytápěny uhlím nebo topným olejem. Výroba mědi z nístějové pece je výhodná pro tavení koncentrátů o větším množství anebo koncentrátů předpražených. Mezi struskotvorné přísady, které se do pece přidávají, patří např. křemen nebo vápenec. Výkonnost nístějové pece se pohybuje od 2,5 do 8 tun na 1 m^2 za 24 hodin. Tento interval je poměrně široký, protože záleží, jak kvalitní surový koncentrát je do pece přidán a jestli je praženec studený nebo horký. Také spotřeba paliva (topný olej) je rozdílná a pohybuje se od 7 do 12 % váhy vsázky, ovšem za předpokladu zpracovávání horkého praženice. Je-li nutné stanovit stupeň odsíření, musí taviči počítat s tím, že 20 až 40 % síry ze vsázky přestupuje do plynů. ^[1]

Ve vsázce přítomný sulfid železnatý (FeS) brání přestupu mědi do strusky. Oxidy mědi se musí převést zpět na sulfidy, které přecházejí do kamínku, a to reakcí se sulfidem železnatým. Do strusky pak přechází oxid železnatý (FeO). Dále dochází k redukci oxidů železa částmi sulfidů železa. Uvolněný oxid železnatý se přitom váže na oxid křemičitý (SiO_2) ze vsázky. ^[1]

Ve strusce – nejlépe kyselé, tj. s nízkou aktivitou FeO – za vysokých teplot dochází k rozpouštění magnetitu. Kromě něj se do strusky redukuje také část železa obsažená v koncentrátu. Měď se koncentruje do kamínku. Pokud struskování magnetitu proběhne nedokonale, dochází k vytváření těžce tavitelných nárůstků na stěnách pece. Magnetit ve strusce také nepřímo zvyšuje obsah mědi díky tomu, že zhoršuje usazování kapek kamínku. Ve strusce vzniklé v nístějové peci se obsah mědi pohybuje od 0,3 do 0,6 % (obr. 5).^[1]



Obr. 5 Nístějová pec^[10]

1.3 Tavení mědi v konvertoru

Nová technologie tavení měděného kamínku při výrobě surové mědi se provádí tzv. konvertorovým dmýcháním, kdy se vzduch dmýchá do roztaveného kamínku. Podobný princip je využíván při zkujňování surového železa. Kombinují se dva pražící pochody – redukční a reakční. Roztavený kamínek s obsahem kyselých přísad se vlévá do konvertoru s kyselou vyzdívkou, v případě zásaditých přísad do konvertoru se zásaditou vyzdívkou a dále je do konvertoru přidán stlačený vzduch. Strusku tvoří oxid vzniklý ze zbytků sulfidu železnatého, přičemž dochází k oxidaci sulfidu měďného na oxid měďný, který reaguje se sulfidem měďným za vzniku mědi dle rovnice^[1]:

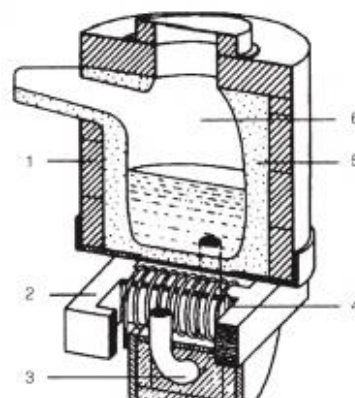


Oxidické rudy obsahující měď lze za vysokých teplot zpracovávat redukcí koksem. Vzniklá surová měď umístěná na anodě se posléze elektrolyticky čistí, na katodě vzniká čistá měď a anodový kal je tvořen nečistotami jako jsou zlato, stříbro a různé těžké kovy.^[1]

2 TECHNOLOGIE TAVENÍ SLITIN NA BÁZI MĚDI

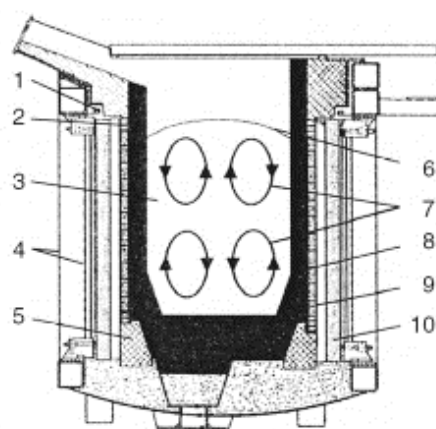
Nejčastější způsob tavení slitin mědi je v pecích vytápěných plynem, elektrických odporových pecích nebo v elektrických indukčních pecích, které se rozdělují na dva základní druhy:

- Kanálkové pece, tj. pece s železným jádrem: 1 – izolační vrstva, 2 – jádro transformátoru, 3 – kanálek, 4 – primární cívka, 5 – ohnivzdorná vyzdívka, 6 – tavicí prostor (obr. 6).
- Kelímkové pece, tj. pece bez železného jádra: 1 – kroužek spojený nakrátko, 2 – prstenec chlazený vodou, 3 – tavenina, 4 – ocelová kostra, 5 – betonový prstenec, 6 – kopulovitá hladina, 7 – vířivé pohyby taveniny, 8 – kelímek, 9 – induktor, 10 – svazek plechů (obr. 7).^{[11], [12]}



Obr. 6 Schéma kanálkové pece^[13]

Elektrické indukční pece bývají nejčastěji napájeny proudem o nízkém až středním kmitočtu. Základem kanálkové indukční pece je transformátor s uzavřeným železným jádrem. Primární cívka je připojená na síť, sekundární část tvoří kanálek, který vyplňuje roztavený kov. V elektrických indukčních pecích se taví barevné kovy – slitiny mědi, niklu nebo hliníku. Mezi výhody pecí s železným jádrem se řadí fakt, že nedochází k nauhličení roztavené slitiny (platí i pro slitiny železa) jako je tomu např. u obloukové pece. V těchto pecích se také tavenina víří, kovy a přísady přidávané do vsázky jsou proto lépe promíchány a v neposlední řadě mají tyto pece vysokou elektrickou účinnost, a to od 85 do 95 %.^[12]



Obr. 7 Schéma kelímkové pece^[14]

Pece bez železného jádra mají uvnitř válcového induktoru umístěn keramický kelímek. Účinnost kelímkové pece je nižší než kanálkové, neboť díky absenci železného jádra se magnetické siločáry uzavírají ve vzduchu a tím dochází ke ztrátám energie. Vsázka v nevodivém kelímku je roztavena při vystavení elektromagnetického vlnění, které vytváří cívka, jíž protéká proud. Elektrická účinnost pece vzroste při použití vodivého kelímku.^[12]

Elektrické odporové pece fungují na principu sálání topných článků umístěných přímo v peci. Topné články se vyznačují především velkou rezistivitou, odolností vůči žáru a mechanickou pevností. Na základě těchto požadavků jsou topné články vyrobené z materiálů jako je chrom, železo, hliník, grafit nebo uhlík. Podle teploty se dále rozdělují pece na nízkoteplotní, středoteplotní a vysokoteplotní (obr.8).^[15]

Plynové (plamenné) pece jsou většinou vyhřívány hořáky s proudícím zemním plynem. Oproti elektrickým indukčním pecím je jejich používání levnější. Mezi výhody



Obr. 8 El. odporová pec^[15]

moderních plynových pecí patří minimální tepelné ztráty díky izolačním materiálům a velice přesná regulace teploty v topné komoře (obr.9). ^[15]



Obr. 9 Plynová pec ^[16]

2.1 Vsázkové suroviny a plyny vzniklé při tavení

Do vsázky jsou přidávány jak suroviny, tj. housky příslušné slitiny a tříděný měděný odpad, tak čisté přísadové kovy pro upravení požadovaného chemického složení a tzv. předslitiny, tj. těžce tavitelné nebo lehce oxidující kovy, např. Cu-Al, Cu-Fe, Cu-Ni, Cu-Cr atd. V čisté formě jsou přidávány prvky jako Sn, Zn a Pb. Přidáváním čisté (elektrovodné) mědi se snižuje koncentrace přísad v tavenině. ^[11]

Suroviny přidávané do vsázky bývají významným zdrojem produkce plynů v tavenině a při tavení slitin mědi na vzduchu dochází k oxidaci a naplynění vodíkem. Zdroje plynů jsou např. katodová měď nebo katodový nikl, oxidy (SO₂, CO₂), vodní pára z pecní atmosféry, vyzdívky nebo vlhké vsázky, dále pak spaliny v pecích a organické nečistoty ve vsázkových surovinách. Voda se při tavení rozkládá na kyslík a vodík a ty se následně rozpouští v tavenině, stejně jako oxid siřičitý a oxid uhličitý. Rovnice, podle kterých oxid siřičitý a uhličitý oxidují taveninu ^{[11],[17], [18]}:



Rozpustnost vodíku v tekutém stavu je vyšší než v tuhém stavu a je závislá na tlaku a teplotě roztaveného kovu. Obsah vodíku v tavenině je v intervalu od 1 do 20 cm³ na 100 g taveniny. V pecní atmosféře obsahující vodík při tavení nastává difúze vodíku do taveniny za přítomnosti oxidu měďného (Cu₂O). Během tuhnutí tak vznikají vodíkové bubliny a odlitek se stává pórovitým s velkým vnitřním pnutím, dochází k iniciaci mikrotrhlin a následnému praskání mědi. Tento jev se nazývá vodíková nemoc. Reakci vodíku s oxidem měďným pak popisuje rovnice ^{[11], [17], [18], [19]}:



Jestliže se uvažuje soustava měď – vodní pára, obsah vodíku rozpuštěný v mědi vyjadřuje vztah

$$[\text{H}] = A \cdot \sqrt{\frac{p}{[\text{O}]}} \quad (2.4)$$

kde: [H] – obsah vodíku rozpuštěný v tavenině,
 [O] – obsah kyslíku rozpuštěný v tavenině,
p – parciální tlak vodní páry v pecní atmosféře,
A – konstanta, která je funkcí teploty (tab. 1). ^[17]

Tab. 1: Hodnoty konstanty *A*. ^[17]

Teplota [°C]	1 090	1 150	1 250	1 350
<i>A</i>	0,0085	0,014	0,022	0,034

Mezi obsahy kyslíku a vodíku v tavenině existuje hyperbolická závislost známá jako Allenův vztah (obr. 10). Ten se dá slovy popsat tak, že s rostoucím obsahem H klesá obsah O a obráceně. Tento vztah je vyjádřen rovnovážnou konstantou, která je závislá na chemickém složení a teplotě taveniny. Lze tedy říci, že s rostoucí teplotou taveniny roste množství rozpuštěných plynů. Znalost tohoto vztahu dává při tavení slitin mědi možnost vést tavbu dvěma způsoby – oxidačním nebo redukčním. ^{[11], [17]}

Aby nedocházelo ke vzniku oxidických vměstků, které vznikají při oxidaci, přidávají se do taveniny krycí a rafinační soli, díky nimž dojde k vytvoření ochranné vrstvy a zachycení nežádoucích vměstků ve strusce. Mezi tyto krycí a struskotvorné přísady (směsi solí, drcené sklo) patří např. Na_2CO_3 , K_2CO_3 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (borax), Na_3AlF_6 (kryolit), CaF_2 a jiné. Borax je velmi užitečná rafinační složka, neboť poskytuje zachování tekutosti taveniny a nedochází k zachycení a ztrátě prvků legujících taveninu reakcí boraxu s oxidickými vměstkami. Tyto oxidické vměstky významně snižují mechanické vlastnosti odlitků. ^{[11], [19]}

2.2 Oxidační vedení tavby

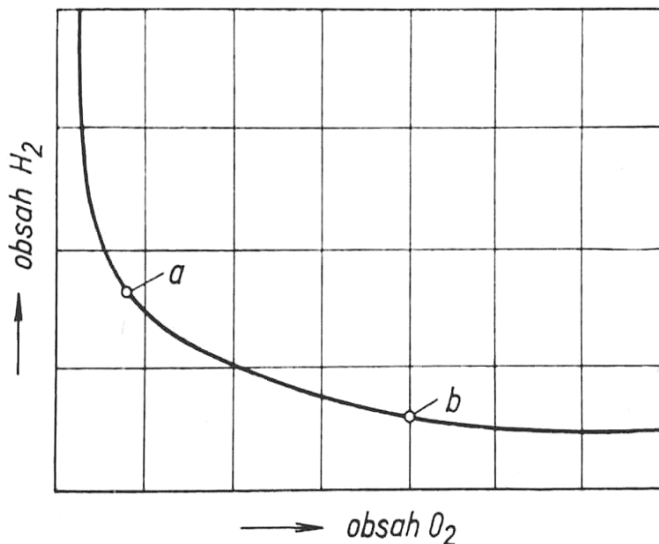
Při oxidačním vedení tavby je záměrně zvyšován obsah kyslíku v kovu, a to buď spalováním paliva s přebytkem vzduchu anebo solemi a přípravky obsahující tzv. nosiče kyslíku, v praxi jsou nejčastěji používány oxid měďnatý (CuO) a oxid manganitý (MnO_2). Oxid měďnatý je do taveniny přidáván ve formě měděných okujů. Za vysokých teplot není stabilní a rozkládá se na oxid měďný a kyslík podle rovnice ^{[11], [17]}:



Vzniklý kyslík se neúčastní oxidační reakce a uniká do okolní atmosféry. Naopak vzniklý oxid měďný se v tavenině rozpouští a reaguje s vodíkem podle rovnice ^{[11], [17]}:



Obsah rozpuštěného vodíku je nízký, proto nehrozí vznik bublin v odlitcích. Protože je v tavenině vysoký obsah kyslíku, je potřeba jej před odléváním snížit na přijatelné množství redukcí dezoxidačními prostředky. Vše vidíme na obr. 10, kde stav *a* je naplynělá tavenina s vysokým obsahem vodíku a nízkým obsahem kyslíku, stav *b* je pak konečný stav, kdy je sice v tavenině nízký obsah vodíku, ale zbylý obsah kyslíku je ještě potřeba dezoxidovat. V tavenině vzniká eutektická soustava $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$, v níž je oxid měďný v podobě malých vměstků. Kyslík je takto téměř všechen vyloučen v podobě oxidu měďného, neboť jeho maximální rozpustnost je v tuhé mědi jen 0,008 %. Vzniklé eutektikum snižuje plasticitu, tažnost a kontrakci mědi, proto je nezbytné dezoxidovat taveninu a tím upravit obsah kyslíku tak, aby byl pod technicky škodlivým množstvím. Eutektikum obsahuje 3,4 % Cu_2O , tj. po přepočtu 0,386 % O_2 při teplotě 1 065 °C. Nevýhodou oxidačního vedení tavby je neschopnost kontrolovat obsah kyslíku, z čehož také plyne vznik většího propalu. ^{[11], [17], [19]}



Obr. 10 Rovnováha soustavy H – O při oxidačním vedení tavby ^[17]

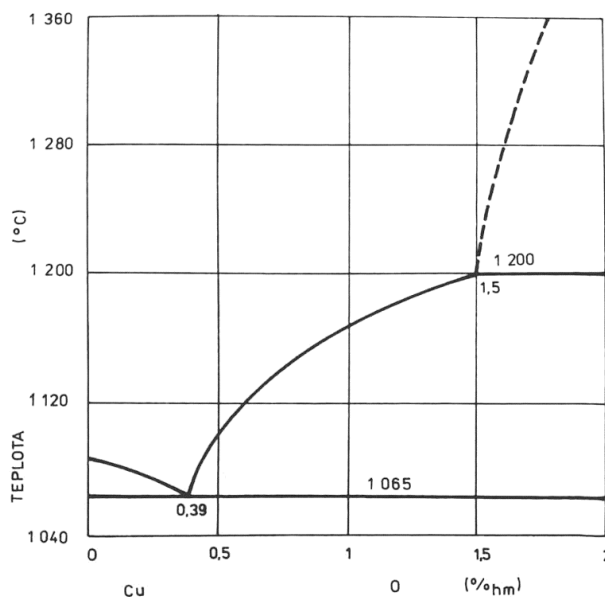
Obsah kyslíku lze pouze určit z metalografického výbrusu. Slitina mědi tvořená čistě z eutektika obsahuje 0,386 % (zaokrouhлено na 0,39 %) O₂, potom lze obsah kyslíku v mědi určit ze vztahu

$$Y = \frac{X \cdot 0,39}{100} \quad (2.7)$$

kde: X – podíl plochy eutektika na výbrusu [%],

Y – obsah kyslíku v mědi [%]. ^{[11], [17], [19]}

Obsah kyslíku v lité mědi je také možné určit na základě binárního rovnovážného diagramu Cu – O. Za předpokladu, že je znám podíl eutektika ve struktuře (obr. 11). ^[20]



Obr. 11 Část binárního diagramu Cu – O ^[20]

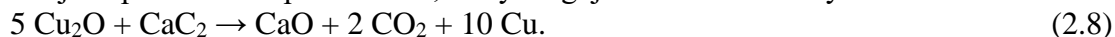
2.3 Redukční vedení tavby

Redukční vedení tavby probíhá v redukčním prostředí, v němž je snaha o zamezení kontaktu kyslíku a taveniny. Toho lze dosáhnout správným nastavením redukčního plamene s přebytkem paliva nebo použitím krycích prostředků, např. posypáním hladiny roztaveného kovu dřevěným uhlím nebo jinými redukčními přípravky. Hlavní nevýhodou této metody tavení je nekontrolovatelné naplynění vodíkem, avšak lze jej částečně omezit použitím krycí soli nebo dřevěného uhlí na hladině taveniny anebo použitím surovin s nízkým obsahem vodíku. Obsah vodíku je ale nakonec potřeba odplynováním před odlitím snížit, např. probubláváním inertními plyny nebo použitím odplyňovacích solí. To vede k ochlazení taveniny, proto se tato ztráta musí kompenzovat vyšším přehřátím, což vede k větším provozním nákladům. Výhodou této metody je, že pro dezoxidaci stačí použít pouze malé množství dezoxidačních prostředků, neboť v tavenině je obsah kyslíku malý. Propal je menší než při oxidačním vedení tavby. ^{[11], [17]}

V praxi je běžné použít kombinované vedení tavby, např. redukčně – oxidační. Nejprve se taví redukčně, neboť je brán zřetel na nižší propal. Následně se místo promytí taveniny reaktivním nebo netečným plynem odstraní z hladiny dřevěné uhlí, případně jiný krycí přípravek, a na hladinu se nanese oxidační tavidlo, dále se taví oxidačním vedením. Opačný způsob je také možný, nejprve se oxidačním vedením tavby v tavenině sníží obsah vodíku, kompletně se ale neodstraní. Stáhne se oxidační struska, tavenina se promyje plynem a následuje dezoxidace. ^[17]

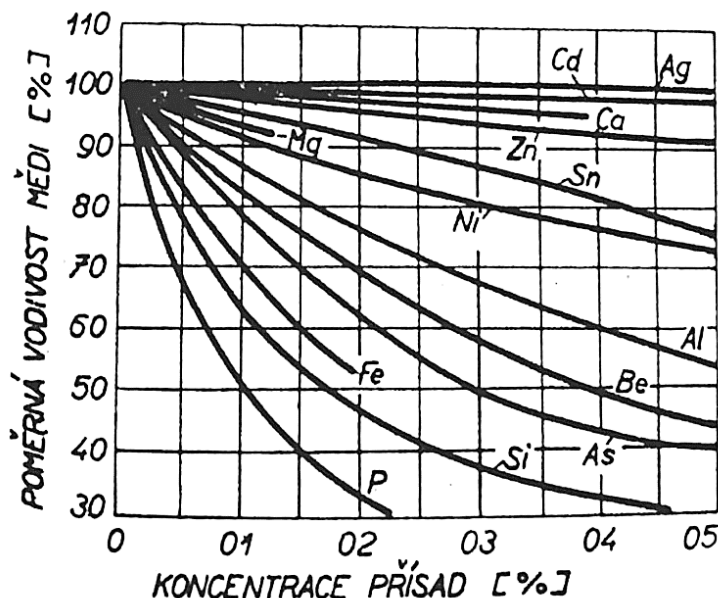
2.4 Dezoxidace

Dezoxidace funguje na principu vázání rozpuštěného kyslíku na prvek s vyšší afinitou než má měď (fosfor, lithium, hořčík, zinek) a je posledním krokem tavby před odléváním. Dezoxidovadla mohou být rozpustná i nerozpustná. Použitím dezoxidačního prostředku musíme dbát na to, že zplodiny, které při procesu vzniknou, musí být snadno odstranitelné. Vzniklý oxid ani zbylý přípravek ve slitině nesmí mít negativní vliv na výslednou strukturu a důležité je posoudit, jak se změní (sníží) elektrická vodivost slitiny. Nerozpustný dezoxidační prostředek je např. karbid vápníku CaC_2 , který reaguje s oxidem měďným reakcí ^[11]:



V praxi se rozpustných dezoxidačních prostředků používá více. Mezi nejběžnější patří zejména:

- fosfor – Do slitin mědi se přidává ve formě předslitiny CuP10 od 0,2 do 0,4 % obsahu. Potom se kyslík ve slitině sníží asi na 0,01 % O. Fosfor výrazně snižuje elektrickou vodivost (obr. 12), proto se dávkování předslitiny pohybuje v tak malém množství – měď s obsahem 0,1 % zbytkového fosforu má jen 55 % IACS (International Annealed Copper Standard – vodivost mědi v rekrystalizačně žíhaném stavu). Přebytek fosforu se také projeví snížením tažnosti slitiny. Dezoxidací vzniká oxid fosforečný (P_2O_5), který při teplotě 347 °C sublimuje, jako plyn probublává taveninou a reaguje se zbylým oxidem měďným. Vzniká fosforečnan měďný (CuPO_3), který ve formě kapiček vystupuje na hladinu taveniny. Tento děj popisují následující rovnice:



Obr. 12 Vliv příměsí na elektrickou vodivost mědi ^[11]

- lithium – Obsah lithia se ve výsledné struktuře pohybuje kolem 0,005 % Li a nemá významný vliv na elektrickou vodivost. S dezoxidací současně probíhá také vázání vodíku dle rovnic:



Oxid lithný i hydroxid lithný se díky své nízké hustotě váží na strusku, a proto jsou lehce odnímatelné. Hydrid lithný je za normálních tavicích teplot nestabilní a váže se tak na oxid měďný za vzniku hydroxidu lithného.

- hořčík – Vzniká nebezpečí, že část nečistot ze strusky přejde zpět do taveniny, a to díky velké afinitě hořčíku (i lithia) ke kyslíku. Proto se musí struska před samotnou dezoxidací z hladiny taveniny odstranit. Hořčík je vynikající dezoxidovadlo a mimo to odstraňuje také některé nežádoucí příměsi. Obsah zbytkového hořčíku se pohybuje kolem 0,01 % Mg a nemá významný vliv na snížení elektrické vodivosti.
- zinek – Je používán pro dezoxidaci slitin mědi, u nichž nejsou nároky na elektrickou vodivost. Slitiny, ve kterých je obsah zinku vyšší, již není nutné dezoxidovat jiným způsobem.
- křemík, mangan – Oba tyto prvky jenom nevýrazně snižují elektrickou vodivost, proto se zejména používají k dezoxidaci slitin pro elektrotechnické účely. ^{[1], [2], [11], [19], [20]}

Slitiny mědi, u kterých je požadována vysoká elektrická vodivost, se obvykle dezoxidují dvoustupňově. V prvním stupni probíhá dezoxidace fosforem tak, aby došlo k odstranění většího množství kyslíku. Ve druhém stupni pak probíhá klasická dezoxidace přípravky jako jsou hořčík, lithium apod. ^[11]

3 VÝROBA SLITIN MĚDI S VYSOKOU EL. VODIVOSTÍ

Požadavek na vysokou elektrickou vodivost mědi, resp. jejích slitin, je splněn, pokud slitiny obsahují minimální množství nekovových vměstků a plynů. Z tohoto důvodu jsou ingoty vyráběny speciálními tavícími postupy. Tavenina se upravuje v ochranné atmosféře anebo v různých tavících agregátech. Mezi využívané nekonvenční metody tavení patří např. obloukové ve vakuu, obloukové plazmové, elektronové nebo elektrostruskové. Znakem těchto postupů je použití čistého zdroje energie při tavení, zamezení kontaktu taveniny s vyzdívkou nebo efektivní propojení samotného tavícího procesu, rafinace a krystalizace. ^[20]

Elektronový ohřev je založen na principu emitace volných elektronů, které slouží jako zdroj tepla, jejich urychlením ve stejnosměrném elektrickém poli a koncentrováním do úzkého svazku, který následně dopadá na povrch kovu. Kinetická energie dopadajících elektronů se téměř dokonale mění na teplo, proto je účinnost elektronového ohřevu velmi vysoká. Děj probíhá ve vakuu, aby nedocházelo ke ztrátám energie v podobě srážek elektronů s molekulami zbytkového plynu. Tímto způsobem se ingoty rafinují tak, že mají homogenní strukturu a velmi vysokou čistotu. ^{[20], [21]}

Vysokým výkonem disponují vakuové obloukové pece. Ty umožňují vyrábět ingoty bez staženin a osově pórovitosti, na druhou stranu nelze z taveniny v dostatečném množství odstranit nekovové vměstky. ^[20]

Plazmové tavení se využívá pro efektivní tavení vsázky, v jejímž obsahu zaujímá velký podíl nevyužitelný odpad. Plazmovým tavením vzniká kov (slitina) s vysokým stupněm čistoty a dokonalou strukturou. Ionizovaný plyn (plazma) se pomocí obloukových plazmatronů zahřívá na velmi vysokou teplotu a tím dochází k tavení kovu. V porovnání např. s tavením v obloukových pecích má tento způsob řadu výhod, mezi které patří:

- použití oxidické, redukční nebo neutrální tavící atmosféry
- snížení propalu díky zvýšenému tlaku nad taveninou
- lehce regulovatelné nastavení teploty
- vysoká čistota taveniny
- bezpečnost provozu plynoucí mimo jiné z jednoduchosti zařízení. ^{[20], [21]}

3.1 Rafinační elektrolýza

Důvodem rafinace (čištění) mědi anebo obecně jakéhokoliv prvku je odstranění nežádoucích příměsí, které v hutích při výrobě kovů vznikají. V práci o rafinační elektrolýze mědi uvádí její autor Mertl, že například příměs 0,05 % uhlíku v mědi zvyšuje její elektrický odpor o 33 %, příměs 0,13 % fosforu o 176 % atd. Je tedy patrný zásadní vliv prvků na elektrickou vodivost mědi. Z těchto důvodů se surová měď musí elektrolyticky rafinovat a teprve poté je možné ji v elektrotechnice využít k výrobě vodičů, které mají minimální elektrický odpor. ^{[1], [8], [22]}

Elektrolytická rafinace probíhá v roztoku síranu měďnatého a kyseliny sírové ($\text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$). Na anodě je umístěna surová měď, kterou je třeba čistit a na katodě se posléze vylučuje elektrovodná měď (obr. 13). Nežádoucí příměsi, které jsou obsaženy v mědi vyrobené v hutích, se buď rozpouštějí v elektrolytu, anebo jsou usazovány na dně jako tzv. anodový kal, jehož hmotnost se pohybuje od 0,5 do 1,5 % hmotnosti anody. Elektrolýzu je možno provádět na základě rozdílných potenciálů kovů. Tímto způsobem lze od mědi oddělit vzácné kovy (zlato, stříbro), které se usazují právě v anodovém kalu. Dalšími oddělitelnými prvky jsou např. olovo, nikl, železo, zinek atd. Děje probíhající na anodě i katodě jsou popsány následujícími rovnicemi ^[22]:



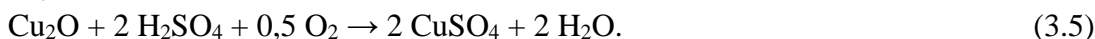
Při nízké teplotě elektrolytu vzniká na katodě měď s drsným povrchem díky hrubozrnné dendritické struktuře. Také se v této struktuře zachycuje více nežádoucích příměsí. Aby došlo ke zkvalitnění povrchu katody, na které vzniká elektrovodná měď a nedocházelo k nežádoucímu zachycení příměsí, musí se rafinační elektrolyza mědi provádět za tepla a do elektrolytu se přidávají tzv. povrchově aktivní látky (PAL) – lepidla a želatiny. Tyto směsi se v elektrolytu částečně rozkládají a část jich tvoří anodový kal. Ideální teplota elektrolytu se pohybuje od 55 do 60 °C. [22]

Dále je nutné zajistit vhodnou cirkulaci elektrolytu tak, aby nedošlo k rozvíření usazeného anodového kalu, v celém objemu elektrolytu byla stejná teplota a nevznikal koncentrační rozdíl mezi elektrodami. Ideální rychlost cirkulace je od 15 do 20 dm³.min⁻¹. [22]

Dalším problémem, který vzniká při elektrolytické rafinaci mědi, je uvolňující se vodík. Ten se může začít uvolňovat, pokud dojde k výraznému poklesu koncentrace mědi v elektrolytu. Na anodě se pak začnou vytvářet jednomocné ionty Cu⁺. Tento děj je vyjádřen rovnicemi [22]:



Vzniká prášková měď z rozkládajících se jednomocných iontů Cu⁺ o objemu 0,1 až 0,2 % z hmotnosti anody, která se posléze usazuje v anodovém kalu. Ionty Cu²⁺ v elektrolytu zvyšují koncentraci mědi a snižují obsah kyseliny sírové. Z anody se poté uvolňuje oxid měďný dle rovnice [22]:

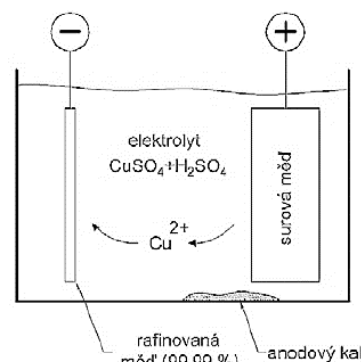


Příměsi, které se mohou při provádění elektrolytické rafinace mědi v elektrolytu vyskytnout, se rozdělují do 4 skupin na základě praktických poznatků:

- Kovy ušlechtilější než měď – téměř neznečišťují katody, usazují se v anodovém kalu (zlato, stříbro).
- Kovy těžko rozpustné v elektrolytu – koncentrují se v anodovém kalu (olovo, antimon, cín, bismut).
- Kovy rozpustné v elektrolytu – zejména snižují schopnost vedení proudu (arzen, železo, nikl).
- Prvky obsažené v anodách – tvoří sloučeniny na anodě, hromadí se v elektronovém kalu (selen, telur). [22]

3.2 Elektrostruskové přetavování

Metoda elektrostruskového přetavování, angl. ESR (Electroslag remelting), je moderní a progresivní metoda tavení (nejen) slitin mědi s vysokou elektrickou vodivostí, které mají dobré vnitřní vlastnosti a nejsou kontaminovány nežádoucími prvky jako např. hliník, resp. jsou kontaminovány prvky o nízkém hmotnostním zastoupení vůči obsahu ingotu, např. síra. Při jejím použití dochází hlavně ke zlepšení vlastností vzniklých ingotů, a to jak technologických, tak fyzikálních a mechanických. Proces výroby čistého ingotu je takový, že vzniklým odporovým teplem strusky dochází k tavení vsázky. Struska je elektricky vodivá a působí jako odporový topný článek. Vsázku tvoří elektroda (katoda) obsahující měď a legující prvky, jíž protéká vysoký proud. Tavením katody stéká roztavený kov přes strusku do krystalizátoru chlazeného vodou, v němž tuhne. Ve strusce zároveň dochází k čištění taveniny od nežádoucích příměsí a vměstků. Počítačový software udržuje stabilizovaný tavící proces a ponor elektrody. Měřením napětí, resp. elektrického odporu, také reguluje hodnotu protékajícího proudu. Vzniklé ingoty jsou specifické díky svému hladkému povrchu, vysoké hustotě, jemné



Obr. 13 Elektrolytická rafinace mědi [23]

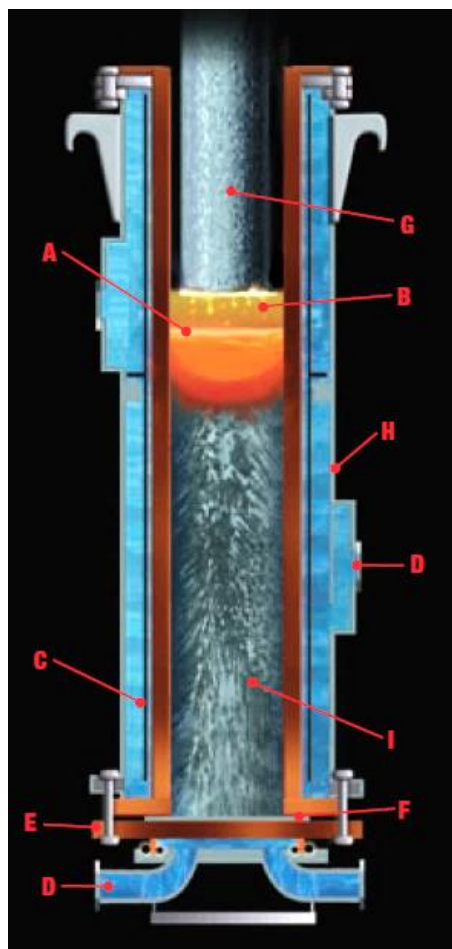
homogenní struktura a vysoké čistotě, co se nežádoucích příměsí a plynů týče. Je tedy dosaženo požadované vysoké elektrické vodivosti. Tavení obvykle probíhá v prostředí inertního plynu, který zabraňuje oxidaci strusky. Struska nad taveninou zároveň zabraňuje oxidaci taveniny na vzduchu. Metoda je nejčastěji používána na slitiny typu Cu-Cr, Cu-Cd, Cu-Fe apod. [20], [24], [25]

Velkoplošné ingoty, které mají hmotnost jednu tunu a více, se na druhou stranu nemusí nutně vyrábět elektrostruskovým přetavováním, ale podle toho, jakým způsobem se budou odlévat do formy. Slitiny mědi mají vyšší tepelnou vodivost než oceli, a protože je jejich rychlost tuhnutí vyšší, mohou se projevit různé vady takto vzniklých odlitků. Vysoká tvárnost za tepla se zhoršuje, pokud je na tavení použit nevhodně zvolený anebo laciný materiál, jenž obsahuje síru, která se odděluje na hranicích zrn a tím se snižuje mezikrystalická pevnost. Dále mohou některé slitiny mědi obsahovat určité množství eutektických sloučenin, které se po nalití do formy v průběhu tuhnutí projeví zhrubnutím zrna, a tedy zhoršenou opracovatelností vzniklého odlitku. [24]

Elektrostruskové přetavování je výstižně vyobrazeno na obr. 14, kde: A – roztavená lázeň, B – roztavená struska, C – kryt pro vodu, D – vodní chlazení, E – základní deska, F – upínací deska, G – elektroda, H – vodou chlazená forma, I – ingot.

Za nedostatek elektrostruskového přetavování lze považovat náročné zhotovení elektrody a znalost formování správné strusky, která musí být aktivní vůči nežádoucím příměsím. Struska se vyznačuje svojí specifickou rezistivitou, teplotou tání a viskozitou. Strusku mohou dle potřeby tvořit následující rafinační směsi:

- $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$
- $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$
- $\text{CaF}_2\text{-LiF-Al}_2\text{O}_3$
- $\text{CaF}_2\text{-NaF-SiO}_2$ v poměru 65:10:25
- $\text{CaF}_2\text{-BaCl}_2$ v poměru 80:20. [20], [24]



Obr. 14 Elektrostruskové přetavování [25]

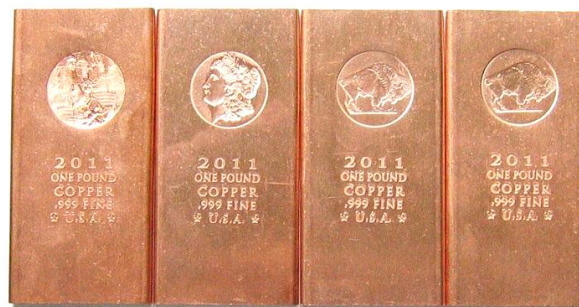
Je-li v elektrodě obsažena síra, je nutné ji při tavení odsířit. Odsíření pak ve strusce probíhá dle rovnice $\text{S} + \text{CaO} \rightarrow \text{CaS} + \text{O}$. Z rovnice pak plyne, že reakce může snadněji probíhat při vyšším obsahu CaO, resp. při nižším obsahu O v tavenině. Slitiny s vysokou elektrickou vodivostí také není vhodné tavit se struskou, jež obsahuje oxid hlinitý (Al_2O_3), neboť hliník výrazně snižuje elektrickou vodivost mědi. Z těchto důvodů byla vyvinuta struska, která splňuje jak odsíření, tak zachování vysoké elektrické vodivosti. Sloučeniny a jejich obsahy ve strusce jsou následující: 20-45 % CaF_2 , 10-30 % CaO , 10-30 % SiO_2 , 10-20 % LiF , 5-15 % ZrO_2 . Tímto způsobem je získána odsířená slitina mědi s hladkým povrchem, jemnozrnnou strukturou, dobrými mechanickými vlastnostmi a bez nežádoucích eutektických sloučenin. Místo oxidu hlinitého je použit oxid zirkoničitý (ZrO_2), neboť v případě, že by se zirkonium ze strusky v malém množství vmísilo do vzniklého přetaveného ingotu, nehrozí zásadní snížení elektrické vodivosti. Účinky jednotlivých složek strusky a důvody jejich hmotnostního zastoupení ve strusce jsou následující:

- 20-45 % CaF_2 – Fluorid vápenatý je hlavní základní složkou strusky, která reguluje zejména viskozitu a teplotu tavení. Při nízkém obsahu CaF_2 ve strusce vzrůstá teplota tavení a tím je dosažení stabilního tavicího procesu podstatně náročnější. S rostoucím obsahem se pak snižuje rezistivita strusky.
- 10-30 % CaO – Oxid vápenatý zvyšuje zásaditost strusky a je hlavním prostředkem v procesu odsíření. Na druhou stranu s rostoucím obsahem CaO roste také viskozita a teplota tavení.
- 10-30 % SiO_2 – Oxid křemičitý podstatně zvyšuje rezistivitu strusky, při vyšším obsahu snižuje schopnost odsíření a zásaditost strusky.
- 10-20 % LiF – Fluorid lithný nutně musí zaujímat minimálně 10 % obsahu, neboť je důležitou složkou při snižování bodu tavení strusky. Vyšší obsah LiF vede ke snížení rezistivity strusky.
- 5-15 % ZrO_2 – Oxid zirkoničitý zvyšuje rezistivitu strusky, tento jev je viditelný až od 5 % obsahu a více. Vysoký obsah ZrO_2 zvyšuje teplotu tavení strusky.
- 0-5 % Cr_2O_3 , TiO_2 , MnO , MgO – Následující sloučeniny mohou, ale nemusí být přidány do strusky za účelem její stabilizace. Při obsahu do 5 % nijak neovlivňují vlastnosti strusky. ^[24]

Elektrostruskového přetavování lze využít při výrobě Cu-Cr bronzu. Chrom oxiduje a při vyšších teplotách vytváří oxidické blány, které negativně ovlivňují kvalitu odlitku. Samotný tavicí proces je tvořen oxidickým tavením mědi, přehřátím na 1 400 °C, dezoxidací lithiem, bórem a hořčíkem a dodatečným přidáním chromu (směs chromu a mědi). Chrom je dobré přidávat do taveniny v ochranné atmosféře, resp. zabránit kontaktu se vzduchem. Tavenina by neměla obsahovat hliník nebo jiné nežádoucí příměsi a předslitinu je výhodné rozdělit na menší, lehčeji zpracovatelné kusy. Také je možné přidávat čistý chrom v podobě tenkých plátků (do 7 mm), ale je nezbytné předejít oxidaci. Negativem tavení chromových bronzů je velmi krátká životnost vyzdívky tavicích zařízení. ^{[24], [25]}

4 TAVENÍ ČISTÉ MĚDI PRO ELEKTROTECHNICKÉ ÚČELY

Hlavním požadavkem na měď nebo její slitiny, které se používají v elektrotechnickém průmyslu, je vysoká čistota s minimálním obsahem nežádoucích příměsí, vměstků a zbavená škodlivých plynů. Takovéto požadavky splňuje elektrovodná měď, jejíž čistota se pohybuje od 99,90 do 99,999 % Cu (obr. 15). Ta je vyrobena rafinačním čistěním surové mědi. Jestliže požadovaný tvar součásti není možné vyrobit jinými technologickými postupy (tvářením), měď s takto vysokou čistotou nelze odlévat běžnými metodami. Z tohoto důvodu je ve slévárenském průmyslu využíváno následujících postupů. ^{[2], [11]}



Obr. 15 Ingoty elektrovodné mědi ^[26]

4.1 Klasický postup

Vsázka je přidána do kelímku předeřátého na více než 100 °C kvůli odstranění vlhkosti a tak, aby nepřesahovala přes jeho okraj. Samotný proces tavení je rychlý a přehřívá se asi 100 °C nad teplotu tavení mědi, která je 1 085 °C. Nejprve se na dno kelímku nanese menší vrstva dřevouhelného prachu, následně se přidá měděná vsázka, přičemž mezery vzniklé ve vsázce se vyplní kousky vysušeného uhlí. Po prvním natavení se přidává další měď dle potřeby. Tavení probíhá redukčním vedením a to proto, aby se po dezoxidaci nesnížila požadovaná elektrická vodivost díky zbylým dezoxidačním prostředkům – vsázka má tedy obsahovat co nejmenší obsah vodíku. Většinou se dezoxidace neprovádí fosforovou mědí CuP10, neboť fosfor velmi negativně ovlivňuje elektrickou vodivost mědi, ovšem je možné dezoxidovat dvoustupňově. Dezoxidace se nejčastěji provádí prvky jako jsou křemík, hořčík, beryllium a lithium. Rovnice, podle kterých jednotlivé dezoxidace probíhají, jsou ^[17]:



4.2 Stupňovitá dezoxidace

Problematika stupňovité dezoxidace již byla zmíněna v předchozím odstavci. Fosfor ze všech ostatních příměsových (dezoxidačních) prvků snižuje nejvíce elektrickou vodivost. Podstatou tohoto postupu je dezoxidace velkého množství kyslíku zinkem, zbytkový kyslík se pak dezoxiduje fosforem. Stupňovitá dezoxidace má tedy dva stupně. V prvním stupni se po natavení vsázky, jejím přehřátí asi na 1 200 °C a stažením strusky přidá do taveniny od 0,3 do 0,5 % Zn. Tím se obsah kyslíku ve slitině sníží asi na 0,30 až 0,35 %. Ve druhém stupni se do taveniny přidá od 0,05 do 0,07 % P a tím se zbytek obsahu kyslíku sníží na přijatelné minimum tak, aby byla zachována vysoká elektrická vodivost mědi. ^[17]

4.3 Vázání zbytkového dezoxidovadla

Tento postup tavení mědi vychází z úvahy, že příměsí rozpouštěné v mědi s ní vytvářejí homogenní tuhý roztok a snižují tak elektrickou vodivost. Prvky, jako jsou např. olovo, bor nebo chrom, mají v mědi jen velmi malou rozpustnost, při jejich vyšším obsahu se v tavenině vylučují heterogenně a tvoří nové fáze. Tyto fáze už elektrickou vodivost nesnižují. Princip je potom takový, že dezoxidovadlo, v tomto případě fosfor, se váže na novou heterogenní fázi, která elektrickou vodivost už dále nesnižuje. Problémem může být prvek chrom, protože čím

více zůstane v roztoku chromu po ochlazení na pokojovou teplotu, tím více elektrická vodivost mědi klesne. Vázání zbytkového dezoxidovadla se provádí prvky:

- železo – Se zbytkovým fosforem po dezoxidaci vytváří železo heterogenní fázi Fe_2P (fosfid železa). Negativní vliv fosforu na elektrickou vodivost mědi je tedy potlačen a nedojde už k jejímu dalšímu snižování. V praxi je poměr přísad železa a fosforu 6:1.
- vápník – Po dezoxidaci fosforem se do taveniny přidává v předslitině CuCa20 . Poté se v mědi vytvoří nová nerozpustná fáze Ca_3P_2 (fosfid vápenatý), která nesnižuje elektrickou vodivost. Obsah fosforu v tavenině se volí přibližně stejně velký jako očekávaný obsah kyslíku. Dále se přidá asi čtyřnásobek vápníku vůči obsahu fosforu, čímž je zaručena úplná dezoxidace. Tímto postupem lze dosáhnout měrné elektrické vodivosti 50 až 53 $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$. [2],[17]

5 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY MĚDI

Slitiny mědi se rozdělují na dvě základní skupiny podle přísadového prvku – bronz (slitiny mědi a jakéhokoliv prvku kromě zinku) a mosazi (slitiny mědi a zinku). Ať už bronz nebo mosaz, slitiny mědi mají své nezastupitelné využití v podstatě ve všech odvětvích. Nejvíce jsou využívány v elektrotechnickém průmyslu díky vynikající elektrické vodivosti mědi. Dále pak ve stavebnictví jako rozvody plynů, vody a klimatizace, v architektuře jako okapy, střešní krytiny nebo doplňkové předměty do interiéru, ve zdravotnictví, v solárních panelech, v mobilních telefonech, v automobilovém průmyslu anebo v potravinářském průmyslu jako varné kotle alkoholických nápojů a hrnce pro klasickou přípravu pokrmů. ^{[1], [2]}

Největší zastoupení slévárenských slitin mědi zaujímají slitiny s cínem, zinkem a olovem, dále pak pokročilejší slitiny s hliníkem, chromem nebo kadmíem.

5.1 Bronzy

Bronzy jsou slitiny mědi a jakéhokoliv jiného přísadového prvku kromě zinku s převládajícím obsahem mědi. Z historického hlediska jsou to nejstarší odlévané kovy (až 3 000 let př. n. l.). Podle hlavního přísadového prvku (skupiny prvků) je lze rozdělit do čtyř základních kategorií na:

- cínové
- olověné
- cínoolověné
- hliníkové. ^{[11], [17]}

Slévárenský průmysl definuje rozdělení podle šířky pásma tuhnutí mezi teplotami likvidu a solidu na slitiny, jejichž interval tuhnutí je:

- do 50 K (Cu-Mn, Cu-Al, Cu-Cr)
- od 50 do 110 K (Cu-Si, Cu-Ni)
- nad 110 K (Cu-Sn, Cu-Sn-Pb, Cu-Pb). ^[11]

Význam šířky intervalu tuhnutí je schopnost dosazovat kov přes tuhnoucí odlitek a segregovat přísadové prvky. Mikrosegregace je možnost vzniku jiné strukturní složky na okrajích zrn než v jejich centru. Makrosegregace vzniká u sloučenin s nižší teplotou tuhnutí koncentrujících se na okrajích zrn a v částech odlitků tuhoucích jako poslední (tepelná osa). U slitin s úzkým intervalem tuhnutí pak dochází k dobrému dosazování kovu do velké vzdálenosti, nedochází ke vzniku mikrostaženin, slitina z velké části soustřeďuje tvorbu staženin do nálitků a nedochází k segregaci prvků. Tvorba mikrostaženin a ředin se projevuje u slitin se širokým intervalem tuhnutí za vzniku širokého dvoufázového pásma. Efektivita nálitků je nízká a v odlitcích dochází kvůli odměšování prvků k vysoké chemické heterogenitě, může proto docházet k mikro/makro-segregaci. ^[11]

Čím rychleji probíhá ochlazování při odlévání, tím více se zjemňuje struktura odlitků, omezuje se segregace a celkově se zlepšují vlastnosti. Nejčastěji se slitiny mědi odlévají do pískových forem, využívá se také gravitačního a odstředivého lití do kovových forem. Tlakové lití se využívá jen zřídka, v hutním průmyslu je běžné kontinuální lití. ^[11]

5.1.1 Cínové bronz

Cín ve slitinách Cu-Sn snižuje teplotu tavení, zlepšuje slévárenské vlastnosti, zvyšuje tvrdost a pevnost, na druhou stranu zhoršuje elektrickou vodivost. Rozsah obsahu cínu se běžně pohybuje od 0,5 do 13 % Sn a v závislosti na jeho obsahu a segregaci prvků lze ve struktuře dle diagramu Cu-Sn rozeznávat několik různých fází s jejich specifickými vlastnostmi. Cínové bronz také mohou obsahovat legující prvky, a sice do 2 % Ni a od 0,5 do 1,0 % Pb. Nikl zvyšuje pevnost slitiny, zlepšuje slévárenské vlastnosti a odolnost proti korozi, vylučuje se jako

intermetalická sloučenina Ni_3Sn . Olovo se ve struktuře koncentruje na hranicích zrn mědi, zlepšuje obrobiteľnosť slitiny, avšak zhoršuje pevnosť a plasticitu. Do cínového bronzu lze také přidat do 1 % P, potom se tento bronz nazývá fosforový a používá se zejména pro výrobu ložisek, neboť zvyšuje tvrdosť a odolnosť proti otěru. Orientační hodnoty mechanických vlastností cínových bronzů jsou v tab. 2. Odlitky z Cu-Sn slitin nalézají využití jako kluzná ložiska, ozubená kola, čepy, armatury nebo odlitky namáhané kluzným třením, u kterých se požaduje odolnosť proti opotřebení (obr. 16). Mezi speciální cínové bronzы se také řadí zvonovina (20-22 % Sn), zrcadlovin (30-40 % Sn), dělovina (10 % Sn, 2 % Zn) a bronzы k uměleckému lití (5 % Sn, 6 % Zn, 1 % Pb).^{[1], [11], [17], [20]}



Obr. 16 Pouzdro ložiska^[27]

Tab. 2: Orientační hodnoty mechanických vlastností cínových bronzů.^[11]

R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	HB
250-300	140-170	10-30	80-100

5.1.2 Tavení cínových bronzů

Tavbu housek a vratného odpadu z cínových bronzů lze vést buď redukčně (nízký obsah H ve slitině), nebo oxidačně (vysoký obsah H ve slitině). Po redukčním vedení tavby dojde k promytí plynem, aby se zabránilo propalu cínu. V případě oxidačního vedení tavby se hladina pokryje vrstvou dřevěného uhlí, případně jiným krycím přípravkem (borax). Poté se tavenina přehřeje asi na 1 100 až 1 150 °C a dezoxiduje fosforovou mědí CuP10 v množství od 0,2 do 0,3 %. Obecně se pro oba dva způsoby vedení tavby dezoxiduje tak, aby obsah zbytkového fosforu ve slitině zůstal pod 0,02 % P. Následně je ještě možné přidávat do taveniny legující prvky, jako jsou zinek nebo olovo. Případnou rafinaci lze provádět chloridem manganatým (MnCl_2) anebo dusíkem.^{[17], [20]}

Jako produkt vzájemné reakce cínu a oxidu měďného rozpuštěného v tavenině vzniká oxid cíničitý (SnO_2) – jeho přítomnost v tavenině není žádoucí, neboť snižuje mechanické vlastnosti odlitku a tekutost roztavené slitiny.^[20]

Při tavení z výchozích čistých surovin, tzv. matečná tavba, je využita stupňovitá dezoxidace o dvou stupních. V prvním stupni dojde k natavení čisté mědi, jejímu přehřátí o asi 100 °C nad teplotu likvidu a dezoxidaci 0,2 % CuP10. V druhém stupni je do taveniny přidán cín a před samotným odlitím je tavenina dezoxidována 0,1 % CuP10. Obsah fosforu přidávaný do cínových bronzů je omezen požadavkem na tvrdosť výsledné slitiny. Žádoucí pro výrobu ložisek je heterogenní struktura, která je tvrdší a odolnější proti otěru, proto maximální obsah fosforu není předem určen. Omezení je pak u součástí, které budou staticky nebo dynamicky namáhané.^[17]

Ideální lící teploty cínových bronzů se pohybují v intervalu od 1 150 do 1 200 °C, v závislosti na tom, jaký je obsah cínu ve slitině. Interval se zužuje s rostoucím obsahem cínu, s rostoucí tloušťkou stěny odlitku a s klesající intenzitou chladnutí odlitku. Teploty, které jsou nad 1 200 °C zvyšují pórovitost a bublinatost odlitku, naproti tomu teploty pod 1 150 °C zvyšují pravděpodobnost tvorby trhlin, proto je dodržení správné lící teploty velice důležité.^[20]

5.1.3 Hliníkové bronzы

Hliníkové bronzы neobsahují cín a samotný hliník je ve slitině zastoupen 8 až 12 % Al. S rostoucím obsahem hliníku rostou také hodnoty mechanických vlastností, zejména pevnosť v tahu a tvrdosť. Dalšími legujícími prvky jsou železo, mangan a nikl o obsazích až 3 % Fe

a Mn a od 1 do 6 % Ni. Železo zjemňuje strukturu odlitku a precipitačně vytvrzuje matici. S rostoucím obsahem manganu roste také pevnost a zároveň se zvyšuje odolnost proti korozi. Nikl obecně zvyšuje mechanické vlastnosti slitin, ale snižuje houževnatost. Hliníkové bronzы proto vynikají mechanickými vlastnostmi (tab. 3), odolností proti únavě, opotřebení a kavitaci a odolností vůči korozi. Používají se např. v energetice k výrobě kohoutů a potrubí pro přehřátou páru nebo k výrobě oběžných kol Francisovy a Kaplanovy turbíny, právě díky vyšší odolnosti vůči kavitacnímu poškození. Dále jako třecí ložiska pro vysoká namáhání, ozubená kola nebo součástky odolné vůči mořské vodě (obr. 17). Hliníkové bronzы s obsahem nad 10 % Al lze tepelně zpracovávat a tím zvýšit jejich mechanické vlastnosti. [1], [11], [17], [20]



Obr. 17 Armatura z hliníkového bronzу [28]

Tab. 3: Orientační hodnoty mechanických vlastností hliníkových bronzů. [11]

R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	HB
500-650	180-300	15-30	100-150

5.1.4 Tavení hliníkových bronzů

Díky tomu, že má hliník vysokou afinitu ke kyslíku, vzniká jejich vzájemnou reakcí při tavení oxid hliníkový (Al₂O₃). Ten se soustřeďuje na hladině taveniny a zabraňuje tak další oxidaci, což je zároveň nevýhodou v případě vodíku rozpuštěného v tavenině na vodní páru – ta by tak snadno mohla vystoupat na hladinu v podobě bublin. Vedení tavby se použije pouze neutrální nebo mírně oxidační, a to v důsledku odplynění rozpuštěného vodíku. Rozpustnost vodíku ve slitinách mědi a hliníku je menší než ve slitinách s absencí hliníku. Neúčinná je dezoxidace fosforovou mědí díky vyšší afinitě hliníku ke kyslíku. Fosfor také zvyšuje křehkost odlitků. Doba tavení je co nejkratší, před odléváním se musí stáhnout struska s oxidy. Důležitým faktem je, že hliníkové bronzы nelze krýt dřevěným uhlím, protože by došlo k vysokému nauhličení taveniny. Ke krytí se používá např. směs drceného skla a Na₂CO₃ v poměru 1:1. Před odléváním při teplotách mezi 1 100 a 1 200 °C se také tavenina rafinuje, a to buď chloridem manganičitým (MnCl₂), anebo kryolittem (Na₃AlF₆). [17], [20]

K mateční tavbě se používá čisté mědi, niklu, předslitin CuAl a CuAl25Fe25 anebo binárních předslitin CuFe10 a CuAl33. Samotný čistý hliník se do taveniny nesmí přidávat, neboť by byla vyvolána exotermická reakce s následky velmi silné oxidace hliníku. Měď se před přidáním slitiny CuAl33 dezoxiduje manganovou mědí CuMn30, která zabraňuje vytvoření pěny oxidu hliníkového. Variantou je místo slitiny CuMn30 přidat čistý mangan v množství 0,02 % Mn. Krycí přípravky se používají takové, které mají zároveň čisticí funkci a které výborně převádějí rozpouštěné oxidy do strusky. [17]

5.1.5 Chromové bronzы

Technické slitiny chromu s mědí obsahují většinou od 0,4 do 1,2 % Cr, ale chemické složení slitiny se odvíjí od požadavku na její vlastnosti. Odlitky z chromových bronzů mají využití zejména tam, kde se požaduje vynikající tepelná i elektrická vodivost a také dobrá odolnost proti otěru, např. jako kontaktní bríty elektrických spínačů nebo zemnicí a zkratovací kontakty. Nejlepší mechanické vlastnosti odlitků z chromových bronzů jsou dosaženy rozpouštěcím žiháním, ochlazením do vody a následným vytvrzením. [11], [29]

5.2 Mosazi

Mosazi jsou slitiny mědi a zinku, případně dalších legujících prvků. Jsou lépe slévateľné než bronzy a mají užší interval tuhnutí. Běžná mosaz obsahuje od 32 do 42 % Zn. Rovnovážný diagram Cu-Zn se skládá z velkého množství fází, za zmínku pak stojí rozpustnost 32,5 % Zn v substitučním tuhém roztoku α při teplotě 903 °C a maximální rozpustnost 39 % Zn při 454 °C. Oblast výskytu substitučního tuhého roztoku α ovlivňují přísady, které jsou do mosazi přidávány. Podle toho se rozlišuje několik základních skupin mosazí:

- žlutá mosaz – slitiny CuZn(SnPb)
- bílá mosaz – slitiny s vysokým obsahem manganu (10-20 % Mn)
- mosazné pájky – slitiny s obsahem zinku 42-54 % Zn
- stříbrné pájky – slitiny s obsahem 30-50 % Cu, 25-52 % Zn a 4-45 % Ag. [11], [17]

Ve slévárenství nalézají mosazi využití při výrobě armatur, součástí čerpadel, pouzder, vybavení interiérů a exteriérů domů nebo při uměleckém odlévání bižuterie (obr. 18). [1], [11]



Obr. 18 Mosazná dveřní klika [30]

5.2.1 Vliv legujících prvků na vlastnosti mosazí

Vlastnosti slévárenských mosazí jsou ovlivňovány doprovodnými legujícími prvky, mezi které patří např.:

- olovo – Zlepšuje obrobiteľnost, ovšem snižuje houževnatost. Mosazi legované olovem jsou známé jako automatové, obsah olova v nich se pohybuje do 3 % Pb. Lze jej metalograficky identifikovat při obsahu nad 0,1 % Pb.
- železo – Ve slitině má funkci jako krystalizační zárodek, čímž zjemňuje velikost zrna při krystalizaci. Zpevňuje také matici α , ve které se vylučuje ve formě precipitátů. Lze jej metalograficky identifikovat při obsahu nad 0,35 % Fe, při tomto obsahu tvoří ve slitině precipitáty.
- nikl – Zvyšuje odolnost proti korozi a houževnatost, způsobuje ovšem hrubnutí zrna. Obsah se pohybuje do 1 % Ni.
- mangan – Obvyklý obsah manganu v mosazích je až do 5 % Mn, ve větším množství se přidává pro zvýšení mechanických vlastností a odolnosti proti korozi, zejména pokud je slitina použita v mořské vodě.
- cín – Výrazně zužuje oblast substitučního tuhého roztoku α . Zvyšuje pevnostní vlastnosti mosazí, zabíhavost taveniny a chemickou odolnost hlavně v mořské vodě. Obvyklý obsah se pohybuje od 0,5 do 1,0 % Sn.
- hliník – Disponuje podobným účinkem jako cín, zvláště zvyšuje odolnost proti korozi. Jako legující prvek vytváří na površích mosazných výrobků antikorozi vrstvu Al_2O_3 . Díky tvorbě oxidů zhoršuje slévárenské vlastnosti a způsobuje pórovitost odlitků. Obvyklý obsah se pohybuje od 0,15 do 0,30 % Al. [11], [20]

Mechanické vlastnosti mosazí mohou nabývat jak vysokých, tak nízkých hodnot. Jelikož existuje široká škála chemického složení, kterou lze pro strukturu mosazí uplatnit, existuje také široká škála mechanických vlastností, závisících mimo jiné na tzv. zinkovém ekvivalentu. Ekvivalentní obsah zinku (Zn_{ekv}) posuzuje vliv jednotlivých prvků na oblast substitučního tuhého roztoku α , kde jednotlivé prvky mají přiřazeny koeficienty odpovídající jejich účinku vzhledem k účinku zinku. V rozmezí asi od 34 do 45 % Zn_{ekv} klesá podíl fáze α , pevnost v tahu vzrůstá přibližně na dvojnásobek a poté rychle klesá. Dále vzrůstá tvrdost na dvojnásobek a tažnost klesá na méně než polovinu. Mechanické vlastnosti v tab. 4 jsou proto jen velmi orientační. Jak lze vidět v tabulce, hodnoty např. meze pevnosti a tvrdosti jsou velmi závislé na

přítomnosti vybraných prvků. Z hlediska slévárenského mají mosazi vlastnosti vynikající, a to především díky velice úzkému pásmu tuhnutí – dobrá zabíhavost a pouze nepatrný sklon ke vzniku ředin. ^{[11], [20]}

Tab. 4: Orientační hodnoty mechanických vlastností mosazí. ^[11]

R _m [MPa]	R _m [MPa] manganová mosaz	A [%]	HB	HB legovaná mosaz
200-300	500-750	10-20	70-100	až 200

5.2.2 Tavení mosazí

Tavení mosazí probíhá dvěma základními způsoby – tavení jednoduchých (binárních) mosazí, mezi které patří např. Ms 47 nebo Ms 60 a zvláštních (vícesložkových) mosazí (Ms 47 znamená, že slitina obsahuje 47 % Cu). Postup tavení jednoduchých mosazí je takový, že nejprve dojde k natavení mědi v mírné oxidické atmosféře, do které se přidává vsázka obsahující zinek. Tavenina se přehřeje na asi 1 000 až 1 050 °C a jako poslední vsázková složka se přidá přehřátý zinek v konkrétním množství tak, aby nedocházelo ke zbytečnému propalu. Protože je ve slitině vysoký obsah zinku, není potřeba provádět odplynování ani dezoxidaci, neboť zinek je vynikající dezoxidační činidlo. Fosfor je přidáván pouze z toho důvodu, aby se zlepšila zabíhavost u tenkostěnných odlitků. Vysoká tenze zinkových par promývá taveninu, tím nahrazuje promývání taveniny plyny a dochází tak ke snižování obsahu vodíku. Mosaz je proto možné tavit v redukční atmosféře bez toho, aniž by došlo k naplynění vodíkem. Hladinu taveniny je ale možné krýt dřevěným uhlím. ^{[11], [17], [20]}

Mosazi obsahující cín se vyrábějí buď legováním binárních mosazí, nebo se legují zinkem v případě matečné vsázky (oxidační i redukční vedení tavby) a nakonec je přidán čistý cín. Ke krytí taveniny jsou použity buď bezkyslíkaté tavící přípravky nebo dřevěné uhlí. Zinek má vyšší afinitu ke kyslíku než měď, při tavení se tedy oxidy mědi nevytváří. ^{[11], [17]}

Při tavení mosazí s obsahem hliníku dojde na hladině taveniny k vytvoření krycí vrstvy Al₂O₃, která brání oxidaci. Je tedy možné tyto slitiny tavit bez krycích prostředků, popřípadě s krycími prostředky jako je kryolit. Rozpuštěný vodík oxiduje na vodní páru a tvoří v tuhacím odlitku nežádoucí bubliny, přesto se provádí mírná dezoxidace fosforovou mědí nebo přípravky obsahující lithium. Tím je dosažena lepší zabíhavost taveniny a odstraňují se tak i oxidické pleny. ^{[11], [17]}

U prvků se silnou afinitou ke kyslíku se při tavení mosazí používají krycí a rafinační prostředky, jako směs 30 % Na₂CO₃, 40 % CaF₂ a 30 % SiO₂, dále drcené sklo nebo tetraboritan sodný Na₂BO₇. ^[11]

ZÁVĚRY

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat metody a postupy výroby pokročilých odlitků ze slitin mědi, mezi které patří např. odlitky z elektrovedné mědi charakteristické svojí tepelnou a elektrickou vodivostí, dále pak různé typy bronzů a využití těchto slitin ve slévárenském průmyslu.

Nejdříve byl vypracován postup výroby surové mědi od úplného počátku, tzn. zpracování sulfidických rud s obsahem mědi jako jsou chalkosin a chalkopyrit, a následná tavba vzniklého koncentrátu žárovým způsobem, v nístějové peci a v konvertoru. Tavba mědi žárovým způsobem se jeví jako efektivní a účelný způsob získávání mědi. Dále byly zpracovány technologie tavení slitin mědi. Slitiny mědi jsou nejčastěji taveny v pecích vytápěných plynem, elektrických odporových a elektrických indukčních. Důležitou součástí každé tavby jsou plyny vzniklé při tavení. Vodík způsobuje tzv. vodíkovou nemoc, kdy se odlitek stává pórovitým, dochází ke vzniku mikrotrhlin a prasklin v součásti. Obsahy vodíku i kyslíku v mědi jsou vyjádřeny hyperbolickou závislostí známou jako Allenův vztah, díky kterému lze vést tavbu dvěma způsoby – oxidačně a redukčně. Důležitou součástí tavení slitin mědi je také dezoxidace, tedy vázání kyslíku na prvek s vyšší afinitou než má měď. Ta se nejčastěji provádí předslutinou CuP10.

Elektrovedná měď, která se využívá při výrobě odlitků s vysokou elektrickou vodivostí, se vyrábí rafinační elektrolýzou surové mědi v elektrolytu. Během tohoto procesu dochází k čištění této mědi, kdy příměsi ulpívají v anodovém kalu. Déle je možné ji vyrábět elektrostruskovým přetavováním, což je moderní a velmi efektivní metoda, při které se příměsi zachycují ve strusce. Vzniká tak vysoce čistá měď. Následně byly popsány tři specifické způsoby tavení čisté mědi pro elektrotechnické účely, mezi které se řadí postup klasický, postup stupňovitou dezoxidací a postup vázáním zbytkového dezoxidovadla. Ve všech případech je tavena vysoce čistá měď s vysokou elektrickou vodivostí.

Slévárenské slitiny mědi se dělí podle přísadového prvku na dvě základní skupiny – bronzы a mosazi. Ve strojírenství zauímají největší zastoupení slitiny mědi a cínu, zinku, olova, hliníku nebo chromu. Každá z těchto slitin má své specifické vlastnosti, využití, legující prvky a postupy tavení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. Ústí nad Labem: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014, 245 s. ISBN 978-80-260-7132-7.
- [2] NĚMEC, Milan a Jaroslav PROVAZNÍK. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 137 s. ISBN 978-80-01-04116-1.
- [3] Baskřídlovka. In: Audioworks [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: https://www.audioworks.cz/dechy-kdlovky/60490-c-cantabile---baskdlovka-junior--tenor-ladn-b.html?search_query=baskridlovka&results=1
- [4] Relikvie sv. Václava. In: Zlaté mince [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.zlate-mince.cz/relikvie-sv-vaclava-ii--1-oz-med-b-k--00005663>
- [5] Měděný kotel. In: Pixabay [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://pixabay.com/cs/photos/pivovar-m%C4%9B%C4%8F-kotel-pivo-kov%C5%AF-1271858/>
- [6] Chalkosin. In: Wikipedia [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://nds.wikipedia.org/wiki/Chalkosin#/media/File:Chalcocite.jpg>
- [7] Chalkopyrit. In: Wikipedia [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Chalkopyrit#/media/File:Chalcopyrite_angleterre.jpg
- [8] Výroba mědi. VŠCHT v Praze [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/vun/Metalurgie/P16%20Výroba%20mědi.ppt>
- [9] Žárová výroba mědi. In: SlidePlayer [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1969035/>
- [10] Schéma nístějové pece. In: SlidePlayer [online]. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1969035/>
- [11] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [12] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Lenka MRŇKOVÁ. *Průmyslové pece* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013, 101 s. [cit. 2019-04-09]. ISBN 978-80-248-3589-1. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/prumyslove-pece/Machackova_Prumyslove-pece.pdf
- [13] Schéma kanálkové pece. In: FCC Public [online]. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-3--14655?do=clickPostPromo>
- [14] Schéma kelímkové pece. In: FCC Public [online]. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-3--14655?do=clickPostPromo>
- [15] JAGOŠOVÁ, A. *Pece používané při výrobě odlitků z neželezných slitin*. Brno, 2018, 31 s, CD. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie slévárenství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Bořil.
- [16] Plynová pec. In: Art of heating [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://lacasia.net/cz/produkty/katalogove-pece-susarny/prumyslove-pece-slevarny/pece-tavici-plynové-stacionarni-ptp/>
- [17] PÍŠEK, František, Adolf PLEŠINGER a Zdeněk HOSTINSKÝ. *Slévárenství I: Obecná část*. 2., přeprac. a dopln. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1974, 499 s.

- [18] MAZANEC, Karel. Fyzikální metalurgie neželezných kovů a složených materiálů. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1987, 148 s.
- [19] DAVIS, Joseph R. ASM Speciality Handbook: Copper and Copper Alloys. Materials Park: ASM International, 2001, 621 s. ISBN 0-87170-726-8.
- [20] GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. Zlievarenstvo neželezných kovov. Bratislava: Alfa, 1988, 424 s. Edícia hutníckej literatúry.
- [21] DRÁPALA, Jaromír. Plazmová a elektronová metalurgie pro přípravu krystalů kovů a slitin. CSACG [online]. VŠB – Technická Univerzita Ostrava [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2002_21Drapala.pdf
- [22] MERTL, Alexandr. Elektrolýza Cu: Zařízení na rafinaci mědi. Cenia [online]. Trstěnice u Litomyšle, 2006 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX09WMTA1Nl9vem5hbWVuaURPQ18xLnBkZg/OV1056_oznameni.pdf
- [23] Elektrolýtická rafinace mědi [online]. In: . [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-588-9/pdf/123.pdf
- [24] SHINJI, Tanaka, Mizusawa MAMORU a Yamada HITOHISA. THE JAPAN STEEL WORKS, LTD. Slag for electros slag remelting for copper alloy and method for producing copper alloy material. 2010. Japonsko. Přihlášeno 28.10.2010. Dostupné také z: <http://worldwide.espacenet.com/searchResults?DB=EPODOC&compact=false&query=US2010269633>
- [25] Electros slag remelting furnaces. Consarc [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.consarc.com/wp-content/uploads/sites/11/2014/12/esr.pdf>
- [26] Ingoty elektrovodné mědi. In: Quora [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-100-pure-copper-means>
- [27] Pouzdro kluzného ložiska z cínového bronz. In: Roncan [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://cz.glidlager.com/oilless-bearing/bronze-bushings/lead-tin-bronze-bushing-bronze-sleeve-bushings-gra.html>
- [28] Armatura z hliníkového bronz. In: Spojené slévárny, spol. s.r.o. [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.spojeneslevarny.cz/produkty/bronz>
- [29] ESB slévárna, s.r.o. [online]. Brno [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://esbslevarnasweb.webmium.com/materialy-a-odlitky>
- [30] Mosazná dveřní klika. In: Odlitky z barevných kovů Jiří Mejtský [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <http://www.slevarna-meta.cz/mosazne-odlitky>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Název	Jednotka
α	substituční tuhý roztok	—
Zn _{ekv}	ekvivalentní obsah zinku	—
R _m	mez pevnosti	MPa
A	tažnost	—
HB	tvrdost podle Brinella	—

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1: Příklady výrobků ze slitin mědi	9
Obr. 2: Chalkosin	10
Obr. 3: Chalkopyrit	10
Obr. 4: Žárová výroba mědi	11
Obr. 5: Nístějová pec.....	12
Obr. 6: Schéma kanálkové pece	13
Obr. 7: Schéma kelímkové pece.....	13
Obr. 8: El. odporová pec	13
Obr. 9: Plynová pec	14
Obr. 10: Rovnováha soustavy H – O při oxidačním vedení tavby.....	15
Obr. 11: Část binárního diagramu Cu – O	16
Obr. 12: Vliv příměsí na elektrickou vodivost mědi.....	17
Obr. 13: Elektrolytická rafinace mědi	20
Obr. 14: Elektrostruskové přetavování.....	21
Obr. 15: Ingoty elektrovodné mědi	23
Obr. 16: Pouzdro ložiska.....	26
Obr. 17: Armatura z hliníkového bronzu	27
Obr. 18: Mosazná dveřní klika.....	28